

极光相关性质研究报告

极光性质部分：钟泽颖
物理量、相机灵敏度部分：陈登科

2020 年 10 月 25 日

摘要

极光时太阳风所携带的高能粒子与地球高空大气层中的中性气体相碰撞的结果，是唯一能够通过肉眼观测到的具有极区特征的地球物理现象，极光的形态及其在时间上演进的一系列变化，对研究空间天气和太阳风——磁层之间耦合作用具有极其重要的意义。

为了给微小卫星——极光相机项目提供物理量变换、极光强度性质等基本知识，我们通过文献查阅的方式，学习并总结出了该研究报告。

本项研究任务是极光相关性质研究，旨在研究与极光强度相关的辐射度学和光度学等相关物理量及其单位制转换关系、极光相关强度数据、各种极光性质、以及与研究适宜的相机灵敏度。

目录

1	极光强度物理量	5
1.1	辐射度学与光度学物理量及其关系	5
1.1.1	辐射量	5
1.1.2	光度量	6
1.1.3	辐射量与光度量的关系	6
1.2	瑞利单位	7
1.2.1	光瑞利与亮度单位转换	8
1.3	理想模型	8
1.3.1	公式推导	9
1.3.2	视场角与镜头焦距的关系	10
1.3.3	模型合理性	10
2	极光性质	11
2.1	极光基本常识	11
2.1.1	极光成因	11
2.1.2	极光层	12
2.1.3	极光颜色分层	12
2.2	极光粒子	13
2.3	极光粒子沉降	13
2.4	极光卵	13
2.4.1	极光卵与地磁变化	14
2.4.2	极光卵与亚暴	14
2.5	POES卫星	15
2.6	DMSP卫星	16
2.7	全天空极光图像的分类	17
2.8	极光电流指数	18
2.9	极光强度与太阳风-磁层耦合函数的相关	19
2.10	极光亮度范围	25
2.10.1	极光活动Keogram图	25
2.10.2	数据选取	26
2.10.3	计算方法	26
2.10.4	实验过程	27

2.10.5 结论	28
3 相机灵敏度	29
3.1 线性信号模型	29
3.2 噪声模型	30
3.3 信噪比	30
3.4 灵敏度阈值	30
3.5 相机灵敏度阈值参考值估算	31

1 极光强度物理量

1.1 辐射度学与光度学物理量及其关系

1.1.1 辐射量

电磁辐射是能量传播的一种形式，通过这种形式发射、传输或接收的能量称为辐射能，用 Q_e 表示，单位是焦耳（ J ）。

辐射能通量简称辐通量，是指单位时间内发射、传输或接受的辐射能，用 Φ_e 表示，即

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

其单位是瓦特（ W ）。

辐射出射度简称辐出度，是指辐射源单位面积内发出的辐通量，用 M_e 表示，即

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$$

其单位是瓦特每平方米（ W/m^2 ）。另一方面，对于接收也有辐射照度，简称辐照度，是指受照面积内接收的辐通量，用 E_e 表示，即

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA}$$

以上两种情况下， A 分别表示辐射源和被照面的辐射以及受照面积。

辐射强度简称辐强度，是指点辐射源在发出辐射时，在某方向上元立体角内发出的辐通量，用 I_e 表示，即

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$$

其单位是瓦特每球面度（ W/sr ）。

辐射亮度简称辐亮度，是指在某方向上，单位面积辐射源在某方向上的元立体角所发出的辐通量，用 L_e 表示，即

$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{\cos\theta dA d\Omega} = \frac{dI_e}{dA \cos\theta}$$

其单位是瓦特每球面度每平方米（ $W/(sr \cdot m^2)$ ）。其中 θ 是指所考察方向与元单位立体角所指的夹角。

1.1.2 光度量

光通量是指可见光对人眼视觉的刺激程度，用 Φ_v 表示，单位是流明(lm)。光出射度是指单位面积发出的光通量，用 M_v 表示，即

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$$

其单位是流明每平方米(lm/m²)或勒克斯(lx)。

另一方面，对于接收也有光照度，即单位受光照面积所接受的光通量，用 E_v 表示，即

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$$

发光强度是指点光源发光时，在某方向上元立体角发出的光通量，用 I_v 表示，即

$$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$$

其单位是坎德拉(cd)或(lm/sr)。

光亮度是指在某方向上，单位光源面积上的元立体角所发出的光通量，用 L_v 表示，即

$$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{\cos\theta dA d\Omega}$$

其单位是尼特(nit)或cd/m²。

1.1.3 辐射量与光度量的关系

两种量纲体系之所以不同，是在于因为人眼对不同波长的光存在不同的灵敏度。实验表明，对于相同辐通量而波长不同的可见光作用于人眼，人眼所感受的明亮程度有所不同。为了建立二者之间的联系，要探究光谱光效率函数 $V(\lambda)$ ，即人眼对不同波长光所响应的灵敏度对波长的函数。

实验表明，观察场明暗不同时，光谱光效率函数也不同。国际照明委员会(CIE)通过多次实验得到了两种光谱光效率函数，即明视觉光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 和暗视觉光谱光效率函数 $V'(\lambda)$ 。函数图像如下所示（已做归一化处理）。

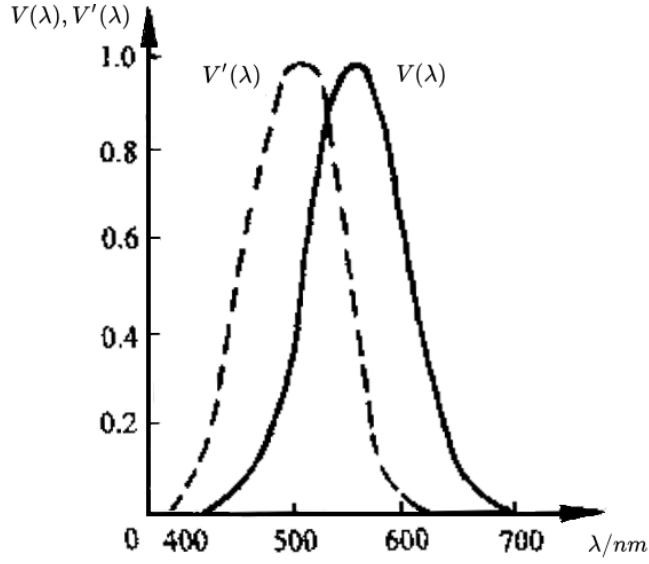


图 1: 明暗视觉光谱光效率函数图像

因此光通量和辐通量之间的关系可以表示为

$$d\Phi_v = K_m V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda$$

其中在明视觉情况下 $K_m = 683 \text{ lm/W}$ ，在暗视觉情况下 $K_m = 1755 \text{ lm/W}$ 。
(K_m 是 $V(\lambda) = 1$ 条件下的绝对光谱效率) 那么对于整个可见光范围内有

$$\Phi_v = \int_{380}^{780} K_m V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda$$

1.2 瑞利单位

空间物理中极光强度的计量单位被称为瑞利单位，其符号是 *Rayleigh*，简写 *R*。瑞利被定义是为了测量空间扩展绝对源的绝对角表面亮度，*Rayleigh* 如同 *Watt* 一样，不会被人类双眼对于颜色的相应所影响。瑞利单位最初被定义表达为总柱发光率 $[10^{10} \text{ photons} \cdot \text{sec}^{-1} (\text{m}^{-2} \cdot \text{column})^{-1}]$ 的单位，即一个表面的光子辐射 $[\frac{1}{4\pi} \times 10^{10} \text{ photons} \cdot \text{sec}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$ 的单位。

从历史角度上说，瑞利单位的命名是为了纪念第四男爵瑞利，他在1930年第一次成功测量了夜间气辉的绝对强度。为了纪念他，美国地球物理联合会专门在瑞利百年诞辰1975年12月在旧金山举行气辉学术会议，并在此会议中，正式将瑞利命名为单位名称。

1.2.1 光瑞利与亮度单位转换

从实用角度来看，*Rayleigh*就是一个简单的依据考虑到立体角的合理化因素的每单位面积上光子辐射率来表示辐射或者光谱辐射的单位。为了从功率光谱辐射转化到瑞利光谱辐射，我们可以使用以下公式

$$R_\lambda = 1.986486\pi\lambda L_\lambda \times 10^{13} R/\mu m$$

其中， λ 为波长，其单位为 μm 。将系数取整，于是得到了一个更容易记住的只有百分之0.7误差的公式

$$R_\lambda = 2\pi\lambda L_\lambda \times 10^{-13} R/\mu m$$

反转公式为

$$L_\lambda = (R_\lambda/2\pi\lambda) \times 10^{-13} W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$$

对于一个波段为 $\Delta\lambda$ 的单色辐射，它的瑞利辐射可以表示为

$$R = R_\lambda \Delta\lambda (W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1})$$

转化为瑞利，公式可以简写成

$$R = 2\pi\lambda L \times 10^{13} (R)$$

反转公式为

$$L = \frac{R}{2\pi\lambda} \times 10^{-13} (W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1})$$

如果说辐射源非单色光时，此时需要使 R_λ 对 λ 进行积分，即

$$L = \int_{\lambda_0}^{\lambda_n} \frac{R_\lambda}{2\pi\lambda} \times 10^{-13} d\lambda (W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1})$$

(待更新)

1.3 理想模型

为了估算极光表面对卫星透镜及感光装置面上的光照功率，我们将问题进行简化，即将极光区域假想成无限大匀光亮度发光平面，并推导出相应公式。

1.3.1 公式推导

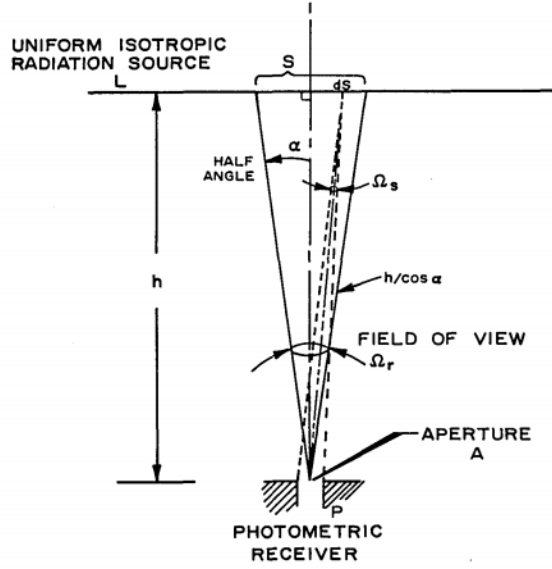


图 2: 用理想视场的光度接收器观察均匀扩展辐射源的几何形状

仪器受光面接受的辐射功率为

$$P = L \int_S \Omega_s dS(W)$$

其中 L 为发光平面亮度， Ω_s 为受光面相对于元光源的立体角

$$\Omega_s = \frac{A \cos^3 \alpha}{h^2} (sr)$$

其中 h 为仪器到无限大发光平面的垂直距离。并且平面上的面积微元可以表示为

$$dS = 2\pi r dr = 2\pi h^2 (\sin \alpha / \cos^3 \alpha) d\alpha$$

再定义仪器可观测最大立体角

$$\Omega_r = \frac{S}{h^2} = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\alpha \sin \alpha d\alpha = 2\pi(1 - \cos \alpha) = \pi \sin^2 \alpha (sr)$$

结合上式，可得

$$P = LA\Omega_r(W)$$

由此我们可以得到仪器受光面的辐照度

$$E_A = L\Omega_r(W/m^2)$$

实际上，极光的亮度并不均匀，因此在使用此公式时取 L 的平均值 \bar{L} （ L 采用SI单位制）。

1.3.2 视场角与镜头焦距的关系

在光学仪器中，以光学仪器的镜头为顶点，以被测目标的物像可通过镜头的最大范围的两条边缘构成的夹角，称为视场角。

视场角的大小决定了光学仪器的视野范围，视场角越大，视野就越大，光学倍率就越小。即，目标物体超过这个角就不会被收在镜头里。

镜头焦距是指镜头光学后主点到焦点的距离，是镜头的重要性能指标。镜头焦距的长短决定着拍摄的成像大小，视场角大小，景深大小和画面的透视强弱。

视场角与镜头焦距有以下关系

$$\frac{h}{f} = \tan \frac{\alpha}{2}$$

由于 α 是小角，因此可以对此公式进行近似

$$\alpha = 2 \arctan \frac{h}{f} \approx \frac{2h}{f}$$
$$\alpha \approx \sin \alpha$$

其中 h 为像高，即CMOS或CCD上的成像宽度。

1.3.3 模型合理性

合适的物理模型需要与实际相近，对实际情况进行分析后，我们讨论了该模型的合理性：

- 1、根据等效原理，如果光度测量仪的视场被一个扩展的各向同性辐射源完全均匀地充满且环境为非吸收介质，则该公式适用；
- 2、根据卫星与地球大气层表面的相对距离和大小比较，因为两者距离足够远，相机透镜相对于地球大气层表面足够小，以至于极光可以覆盖整个相机视场；
- 3、极光产生层与卫星之间的空气足够稀薄，以至于几乎可以忽略辐射传播中途的损耗，即视作无吸收介质。

2 极光性质

2.1 极光基本常识

2.1.1 极光成因

极光是地球周围的一种大规模放电的过程。行星际空间中来自太阳的高速带电粒子形成太阳风，到达地球附近后撞击地球磁场，并环绕地球流动。在太阳风的吹动下，地球磁场呈某种流线型。而在于与行星际磁场相互作用时，地球磁场的两级外各形成了一个“漏斗区”（极光卵），当磁层出现扰动时，磁尾的带电离子被加速，沿磁力线运动，进入“漏斗区”（极光卵）。当他们进入极地的高层大气（ $> 80km$ ）时，与大气中的原子和分子碰撞并激发，能量释放产生的光芒形成围绕着磁极的大圆圈。由于地磁场的作用，这些高能粒子转向极区，所以极光常见于高磁纬地区。在大约离磁极 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的范围内常出现极光，这个区域称为极光区。地磁纬度在 $60^{\circ}-90^{\circ}$ 的范围称为极光区，其中最主要分布在 67° 附近，地磁纬度 $45^{\circ}-60^{\circ}$ 之间的区域称为弱极光区，地磁纬度低于 45° 的区域称为微极光区。

极光最易出现的时期是春分和秋分两个节气来临之前，且春秋两季出现频率更甚夏冬。这是因为在春分和秋分两节气时地球位置与“磁索”交错最甚。另外，在太阳黑子多的时候或当太阳周期在日冕大量抛射增加和太阳风强度增强的阶段时，极光出现的频率和亮度也会增加。极光发生的频率与太阳活动、地磁活动性呈正相关关系。

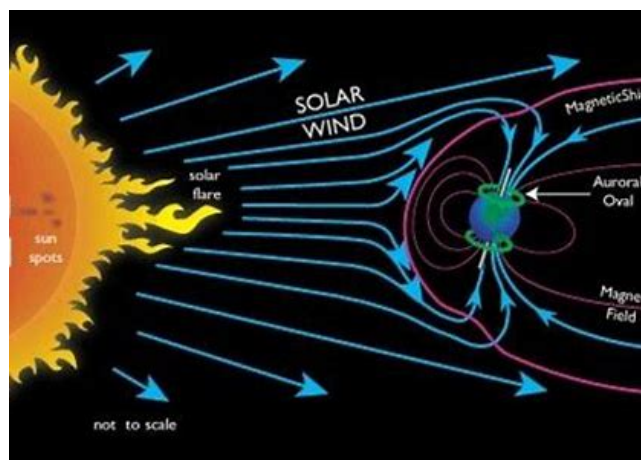


图 3: 极光产生原理简图

2.1.2 极光层

大多数极光出现于地球上空90-130千米处。1959年，一次北极光所测得的高度是160千米，宽度超过4800千米。但有些极光要高得多，高度可达560-1000千米以上。

2.1.3 极光颜色分层

极光呈现的颜色是由以下四个因素决定的：(1)入射粒子的能量；(2)大气中的原子和分子在不同高度的分布状况；(3)大气中原子和分子本身的特性；(4)大气的密度不均匀，基本上越接近地表密度越高。

入射粒子的能量高低决定了粒子能够冲入大气的深度，因此决定了极光产生的高度。

而大气成分随高度的变化决定了入射粒子可能会撞击到哪种原子或分子，因此决定了可能发出的极光波长。不同种类分子在大气中的垂直分布状况影响极光颜色分层。接近地表处，大气的组成十分均匀，百分七十八是氮分子，百分二十一氧分子，这样的组成直到高度约100公里为止都是如此。在更高之处，来自太阳的高能紫外线会将大气分子分解成原子，不同种类的原子受到重力影响而产生不同的分布，较轻的原子会分布在上层。在大气层的最顶端，也就是约在距离地表500公里处，氢与氦原子占了大部分；距离地表200~500公里之间，氧原子的数目最多；在100~200公里之间，则是氮分子的数目最多，其余主要是氧原子和氧分子。因此不同海拔的大气层气体主要发光粒子也不同，不同粒子决定不同发光光谱以及其他物理特性，这些特性直接决定所发出光的颜色。

大气密度会影响极光的颜色。由于高层大气密度较低，发光的过程不会受到原子和分子彼此碰撞的干扰。不过，距离地表越近，大气密度越高，分子之间的撞击较为频繁，这会使得某些波长的光不容易产生。比如，氧原子在第一激发态时被撞击而耗散能量，以至于在海拔较低、气体密度较高的大气层，6300埃的红光受抑制。



图 4: 极光照片

2.2 极光粒子

在太阳风粒子、地球磁层和行星际磁场相互作用下，磁层与电离层之间产生耦合。极光粒子在这种耦合中沉降到极区电离层，作为电离层中的等离子体的主要来源，使电离层中的中性粒子电离，导致粒子成分改变。

极光粒子沉降、焦耳加热、环电流和等离子体片所含的能量是磁层能量收支的基本组成部分。

2.3 极光粒子沉降

极光粒子沉降是亚暴中循环中的一个重要的参数，因为它提供了一个衡量磁层能量输入到电离层的方法。它可以用来表示磁层的状态，因此它应该受到次风暴周期的影响。亚暴过程中大量能量释放出来，其中一些为极区沉淀粒子提供能量。极光沉降粒子依沉降机制的不同可分为引起奋力极光的单能粒子和宽能粒子，引起弥散极光的弥散粒子（电子和离子）。

2.4 极光卵

极光卵是一个绕着地球磁极的极亮光环，是电离层中吸收磁层粒子沉降的主要区域，由于向日的一侧被压缩，而背日侧则稍微拉伸，故呈椭圆形。极光卵赤道向边界的位置取决于沉淀粒子的能量以及磁层电场和磁场。

极光卵极向边界通常作为闭合磁力线与开放磁力线的分界，其所围区域即为被开放磁力线所覆盖的极盖区。

2.4.1 极光卵与地磁变化

研究发现，在极光卵的日侧，极光所覆盖的纬度范围窄，而在夜侧其覆盖的纬度范围则较日侧宽，极光卵的大小与地磁活动密切相关。

下图中Q为地磁活动强度指数。地磁平静时，极光卵相对较小，日侧正午，位于地磁纬度70度-80度处，磁子夜则向赤道侧偏离10度左右，随若地磁活动强度增加，吹响地球的太阳风速度和强度也将大大增强，猛烈撞向求磁场，整个极光卵向赤道向和极向扩展，大小显著增大，正午区将占据进10纬度，而子夜则达20度，夜侧赤道向边界甚至到达50度。

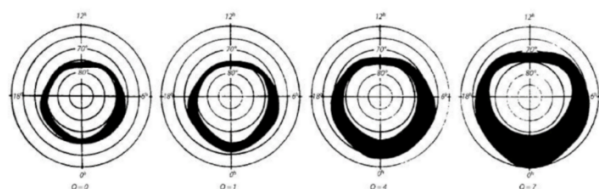


图 5: 极光卵在不同地磁活动下的变化

2.4.2 极光卵与亚暴

亚暴是地球空间环境中基本的能量输入、耦合和耗散过程的表现致以，是一个重要又常见的过程，因地球磁层中循环储存和释放能量的过程而出现，通常有增长相、膨胀相和恢复相三个过程。增长相通常开始与行星际磁场（IMF）转南时的静止期，并在亚暴onset（onset是指亚暴膨胀相突始的点，其定义一般与AL指数有关）结束）。在增长相，随着太阳风能量在磁尾的储存，极光卵赤道向扩张，极光和电射流逐渐增强，等离子体薄片变薄，磁层磁力线拉伸变成尾巴状。膨胀相始于增长相的末尾（亚暴onset时），在该阶段，极光卵向极、东、西方向变亮、扩张，向西的电流显著增加，等离子体内部薄片的磁场结构有拉长的尾状迅速转变为偶极子型。膨胀相之后为恢复相，在此期间磁层逐渐恢复原状，恢复相开始的标志通常为亚暴极光的减弱和西向电集流的减弱，恢复相结束时，磁层完全恢复原状。

2.5 POES卫星

NOAA POES (Polar Orbiting Environmental Satellites) 以及 MetOp (Meteorological Operational) 是太阳同步的极地低轨环境卫星, 每天在距离地球表面约836千米的高度沿极轨飞行14次, 倾角为98.7°, 轨道周期约为102min, 携带有一套SEM (Space Environment Monitor) 仪器, 用来检测中高层大气的粒子环境及预报天气。1998年至今, 已有14颗配有SEM的卫星发射 (Sandanger et al, 2016), SEM包括总能量探测器 (TED)、中能探测器 (MEPED) 以及全向探测器 (OMNI)。

POES/TED主要用来测量低能沉降粒子, 包含八个独立的圆柱形曲面、静电分析仪、沟道电荷粒子探测系统。8个探测系统分为两组, 每组4个, 安装在三轴稳定航天器上, 其中一组使各探测器视场中心沿天顶向外, 平行于地心-卫星径向矢量, 即航天器坐标下的X方向, 称为0°检测器。另一组使每个探测器视场的中心与地心-卫星径向矢量夹角为30°, 朝向航天器坐标的Z方向, 称为30°检测器。其中每组的四个探测系统两个用于测量质子两个测量电子, 测量的能量范围分别为50eV-1KeV和1-20KeV。每个系统的时间分辨率为2s。在极光纬度区, 两组检测器方向通常都在下降损失锥内, 因此为极光粒子沉淀通量提供了可用的数据。

除了TED, SEM-2还包括一套固态高能粒子探测器, 用于检测 30KeV-200MeV的质子和电子。具有这些能量的粒子包括辐射带 (范艾伦带) 粒子群, 高能太阳粒子事件 (太阳质子事件) 中的粒子群, 以及银河宇宙射线的低能部分。这些粒子进入大气层的通量增加, 会使短波无线电传播严重退化, 在极端的情况下, 无线电还会中断。MEPED包括两对定向望远镜和四套全向探测器, 其中两对定向望远镜探测器分别测量质子和电子, 每一对中又分为0°和90°两个方向, 0°探测器沿地球径向朝外, 90°探测器与其垂直, 观测的视场范围均为30°。电子探测器在30-2500keV之间有三个积分能量通道, 质子探测器有5个微分能量通道 (30-6900KeV) 和1个积分能量通道 (6900KeV以上), 表2.1显示了各个能量通道的范围。其余四种探测器系统是圆顶 (或全向) 探测器, 监测与高能太阳粒子事件相关的高能质子通量。

	通道	能量范围 (keV)
质子	0/90 P1	30 - 80
	0/90 P2	80 - 240
	0/90 P3	240 - 800
	0/90 P4	800 - 2500
	0/90 P5	2500 - 6900
	0/90 P6	>6900
电子	0/90 E1	30 - 2500
	0/90 E2	100 - 2500
	0/90 E3	300 - 2500

图 6: MEPED质子/电子能量通道及能量范围

2.6 DMSP卫星

DMSP 卫星也是与太阳同步的极地低轨卫星，其轨道高度 840km，轨道倾角98.8°，周期约为101分钟。1965年1月第一颗 DMSP/F1发射，约每2-3年发射一颗，迄今为止已有19颗卫星发射。SSJ仪器是DMSP卫星携带的用来

测量极区沉降粒子通量的仪器，1974年加入DMSP卫星系统，已由最初的6个能通道，能量范围0.2eV-20KeV发展到现在的SSJ/5有20个粒子能通道，所测能量范围从30eV到30KeV。SSJ4由四个圆柱形曲板静电分析仪分成两对组成，每个分析仪由三个基本组成部分：孔径系统、两个同心柱形弯曲板、一对通道倍增器。孔径系统对进入的粒子进行准直，并限定其进入柱形板间的立体角，确保只测量位于损失锥内的粒子;在板上施加对称电势，产生电场，使进入板间的粒子。

向内板加速运动。如果入射粒子的能量使粒子在其轨道被电场弯曲时所受离心力等于电场力，则粒子通过板间隙，撞击通道倍增器的前端并计数。电子和离子探测器都采用后加速（电子为100V，离子为1000V）以确保单位倍增效率，两种粒子的分析仪除极板上极性相反，低能离子孔径大于低能电子孔径外其它都相同。每对分析仪中两个圆柱形曲板的曲率半径分别为60°和127°，127°分析仪测量由一组曲率半径为60°的圆柱板和一组曲率半径为127°的圆柱板组成。127°探测器测量30-1000eV间以对数为步长的10个通道中的电子或离子，60°探测器测量1-30KeV间以对数为步长的10个通道中的电子或离子（Hardyetal, 1984, 1987）。这两个探测器连在一起，测得的20个通道的数据每秒返回一次。

2.7 全天空极光图像的分类

全天空极光图像是由全天空数字摄影仪拍摄下的覆盖 2π 立体角极光可见光信息的图像，在全天空极光图像中，极光的不同表现形式蕴含着丰富的物理意义，在天空呈现的形状、位置、亮度不同的极光结构与地磁场的变化有着密切的关系，蕴含着丰富的语义信息。

2004年，一项联合研究项目（Canadian Auroral Network for the OPEN Program Unified Study CANOPUS）将极光全天空图像分为四类。弧状极光（Auroral arcs）：该类极光中包含一个或多个极光弧光斑状极光（Patchy auroras）：在整个视场中包含不规则的、明显可见的光斑欧米伽带状极光（Omega-bands）：在视场区域中所出现的明亮的形状如希腊字母 Ω 的光带。

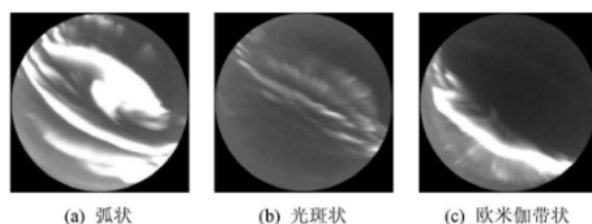


图 7: 全天空图像分类方法1

我国科学家所定义的冕状极光与上文所定义的三种典型极光类型中光斑状极光在形态和属性上近似，而日侧冕状极光是极光在磁正午的主要表现形式，反映了太阳风和地球磁场相互之间的动态作用过程，对分析电离层及其动态特征具有极其重要的意义。

我国科学家以日侧冕状极光为研究对象，根据其中极光卵在不同时间所呈现的不同形态和属性，将日侧冕状极光再细分为三种类型，分别是：帷幔冕状极光（Draperly Corona Aurora）、辐射冕状极光（Radial corona Aurora）和热点冕状极光（Hot-spot Corona Aurora）。

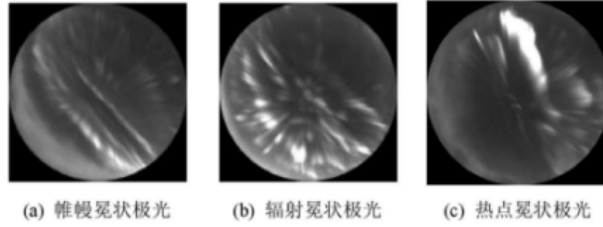


图 8: 全天空图像分类方法2

帷幔冕状极光：在波段557.7nm表现为多条东西走向的射线带，射线结构明显呈现多层重叠排列，看上去像窗帘一样层层叠叠，其特点是平稳、区域分布广，轮廓不清晰，东西强度均匀。**辐射冕状极光：**在557.7波段呈现出较弱的辐射状结构但在630.0nm波段则较强，光线由中心向四周呈辐射状发散，像节日天空的烟花，其特点是射线结构由中心指向四周各个方向。**热点冕状极光：**是一种较为复杂的极光结构，在波段427.8、557.7和630.0nm波段均有密集出现，包含了辐射结构、瞬间强光的光束、点以及不规则光斑，其特点是既包含光斑也包含光线结构，光斑重叠成束状出现。

2.8 极光电流集指数

极区电离层电流体系主要是由场向电流产生的。在平静状态下，极区电流由一对晨昏电流涡组成，而当亚暴发生时，强度为几百万安培的西向电集流造成极区地磁场的剧烈扰。极光电流体系在时空变化上十分迅速剧烈，它主要由晨侧西向电集流和昏侧东向电集流组成，其空间结构位置随着时间的变化并非是同步的因此，我们需要两个参数分别描述东向和西向电集流，用AU（东侧方向正方向）和AL（西侧方向负方向）表示，而AE和AO则是他们的平均值和差值的绝对值。描述亚暴强度的地磁指数是4个极光电集流指数：AU，AL，AE和AO，它们是用12个极光带地磁台的水平分量扰动值计算而得到的。极光电集流指数台站分布在地理纬度55.27° 77.72°范围内，对应的地磁纬度范围是60.67° 70.78°，改正地磁纬度范围是62.33° 71.13°。

极光电集流指数AE，AL和AU之间的关系（1）AL, AU 指数与 AE 指数有很好的线性相关性，所以可以用 AE 指数(乘以适当比例因子)近似代替AL 和 AU 指数，从而简化了分析。这表明，极区最大西向电集流强度和最大东向电集流强度大体上是同步变化的。同时，即极区最大西向电集流约为最

大东向电集流的 4 倍. (2) AE 指数可以近似地表征晨昏电流涡强度以及极区总电流. AE 指数的 1 nT 对应极区总电流 1000 A. (3) AE 指数与最大西向电流密度有很好的正比关系, AE 指数的 1 nT 对应地磁子夜最大西向电流密度 1A/km. 在不同地方时, 这些关系有不同的相关系数和比例因子. (4) 夜间不同地方时电流密度的纬度剖面形态大体相似, 最大西向电流密度一般位于地磁纬度 65° 70°和地磁子夜附近, 而东向电流密度在80°附近达到极大值; 一般情况下, 电流密度值随地磁活动增强而增加. (5) 就 5 min 平均值而言, AE 指数的饱和值约为 700 nT, AL 的饱和值约为 500 nT. 所以, 在研究磁层电离层过程时, 使用饱和值以上的极光电集流指数需十分谨慎. (注: 西向电集流和东向电集流在物理机制或变化形态上, 都有各自的特点, 并不能肯定是同一物理过程产生的. Kamide和 Fukushima认为, 下午扇区的东向电集流和夜间扇区的西向电集流分属两个电流系统: 东向电集流是部分环电流在高纬电离层的闭合电流, 而西向电集流则是亚暴电流楔的一部分。)

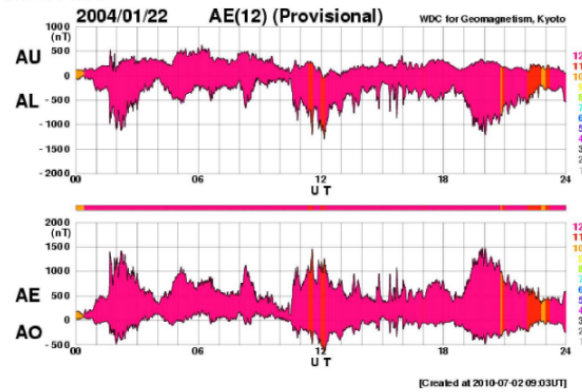


图 9: 极光电流指数图

2.9 极光强度与太阳风-磁层耦合函数的相关

太阳风电场E和太阳风速度V及行星际磁场B之间有关系式

$$E = \frac{1}{c} v B$$

其绝对值为

$$E_1 \propto |vB|$$

此外，太阳风电场还有多种表示方式，在GSM坐标系，yz平面内的太阳风电场为

$$E_2 \propto vB_T \sin(\theta/2) \quad \text{or} \quad E_3 \propto vB_T \sin^2(\theta/2)$$

而太阳风电场的东西向分量为

$$E_4 \propto vB_z$$

横向分量为

$$E_5 \propto vB_T$$

其中， E_1 为行星际磁场的横向分量， E_2 为行星际磁场的南北分量（南向为负）， θ 为行星际磁场时钟角。

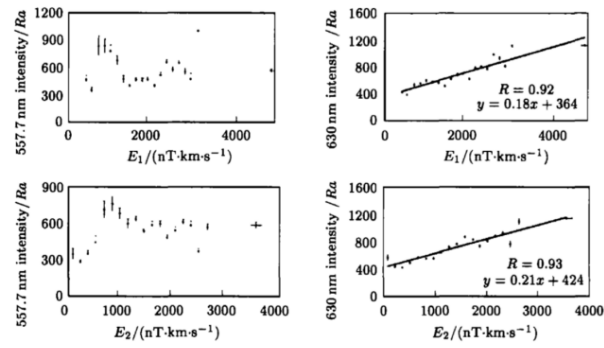


图 10: 极光强度随太阳风电场的变化

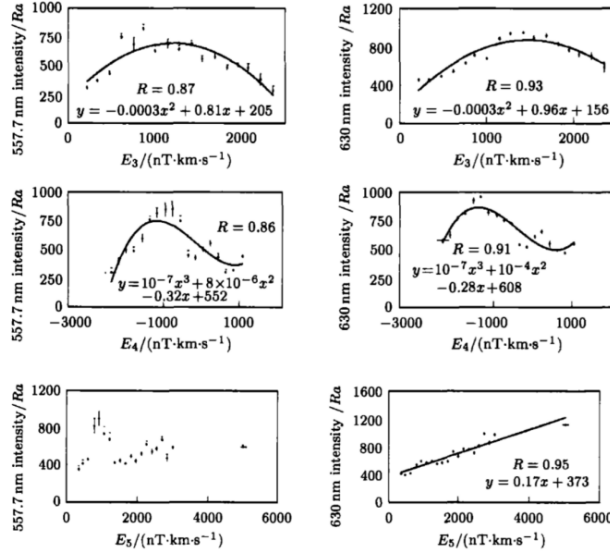


图 11: 极光强度随太阳风电场的变化

为简化起见，上述公式的常数项取 1，因此电场的单位不是标准单位，后面的公式也采用这一办法。上图示出了午后高纬极光强度随电场的变化情况，从上到下，分别对应于 $E_1 E_2 E_3 E_4 E_5$ 左侧对应于 557.7nm 的极光，右侧为 630.0nm 的极光。图中的实线为趋势线，并给出了趋势线的解析式和相关系数；对应的误差为标准偏差。

极光强度与太阳风能量之间的关系太阳风的能量主要有两种表现形式，一种是动能，即

$$E_K = \frac{1}{2} \rho v^3 = D_p v$$

其中， D_p 为太阳风的动压，另一种形式是磁能，即

$$E_m = \frac{1}{8\pi} v B^2 \propto v B^2$$

而与 IMF 有关的太阳风磁能为

$$E_{mz} \propto v B_z^2$$

图二显示出了午后极光强度随太阳风能量通量密度的变化情况，从上到下，分别对应于 E_k ， E_m 和 E_{mz} 。

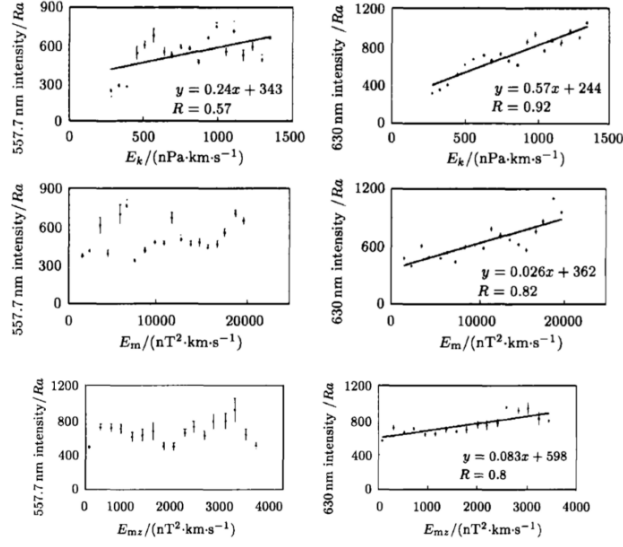


图 12: 极光强度随太阳风能量的变化

极光强度与太阳风-磁层能量耦合函数之间的相关这里考察的能量耦合函数主要有Perreault和Akasofu提出的能量耦合函数

$$\varepsilon_1 \propto VB^2 \sin^4(\theta/2)$$

他们在提出能量耦合函数时，假设太阳风和磁层间的能量耦合是通过交换磁能通量进行的；另一能量耦合函数是由Vasyliunas等在太阳风传输到磁层的能量与太阳风动能成正比的假设基础上提出的，即

$$\varepsilon_2 \propto P^{\frac{1}{3}}VB_T^2 \sin^4(\theta/2)$$

和

$$\varepsilon_3 \propto P^{\frac{1}{6}}VB_T^2 \sin^4(\theta/2)$$

下图显示出了极光强度随能量耦合函数的变化情况，从上往下依次为 ε_1 ， ε_2 和 ε_3

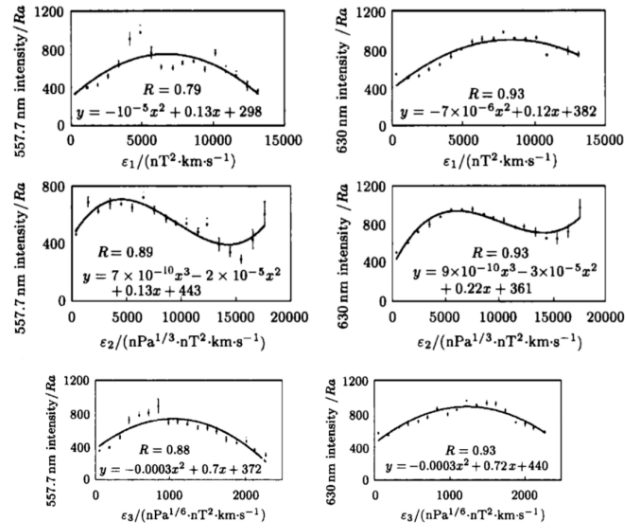


图 13: 极光强度随能量耦合函数的变化

极光强度与越盖电势之间的相关由于太阳风参数估算越盖电势的经验公式很多，这里只考察其中的两个，一个是由Pudovkin等提出的

$$\varphi_1 = 13.6 + 0.07(v - 300) + 4.2n^{-\frac{1}{2}}B_T^2|\sin^3((\theta/2))|$$

另一个是由Boyle等提出的

$$\varphi_2 = 1.01 \times 10^{-4}v^2 + 11.7|B\sin^3((\theta/2))|$$

下图显示出了极光强度随越盖电势的变化情况高纬午后极光强度随越盖电势的变化曲线都是倒V形结构，但对应于不同电势计算方法和不同波长的极光其峰值强度出现的位置不同。

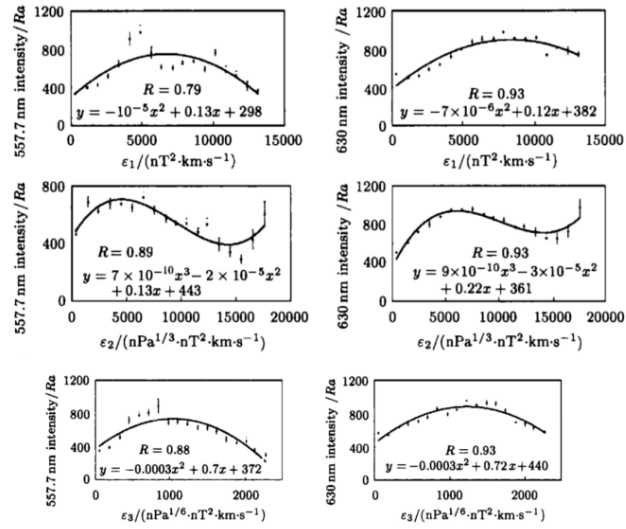


图 14: 极光强度随越盖电势的变化

不同耦合函数之间的相关不同耦合函数之间的相关对午后极光强度与太阳风参数耦合函数之间的相关性可能会产生一定影响。

下表列出了太阳风参数耦合函数之间的相关系数。可以看出，很多不同函数值之间有很强的相关，这是很自然的，因为这些函数的自变量都是太阳风等离子体参数和行星际磁场。

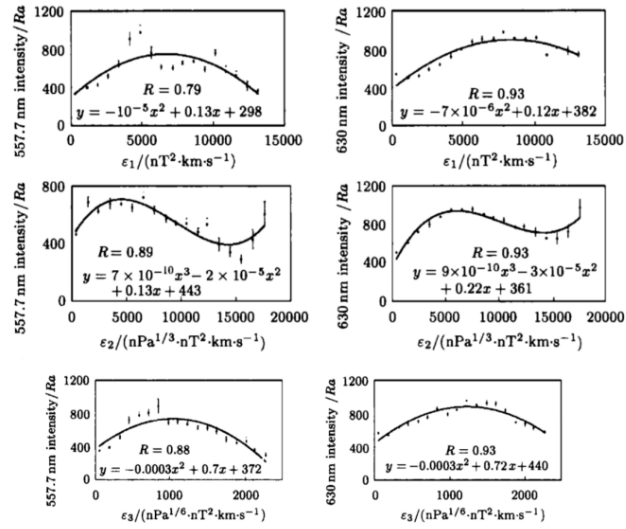


图 15: 太阳风磁层耦合函数之间的相关系数

2.10 极光亮度范围

本节总结文献，估计极光亮度范围。

2.10.1 极光活动Keogram图

拍照得来的 512×512 像素的全天空图像，取磁子午线不同天顶角上的极光强度作为纵坐标，从而得到了关于极光强度与时间空间变化组成的二维图，即Keogram图,简称KEO图。

KEO图作为研究极光形态强度等物理特性的重要工具，表现了极光强度在磁子午线不同天顶角上随时间而变化的特征，准确反映了极光事件的演变过程，并给出极光的运动和极光弧等构造特征。

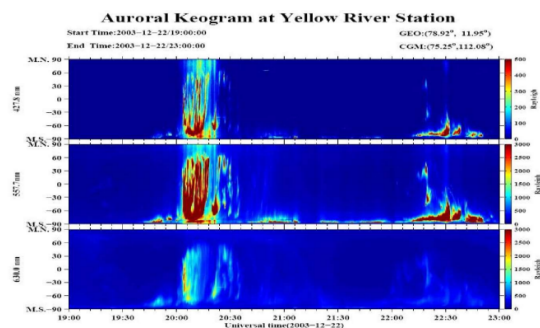


图 16: KEO图示例

2.10.2 数据选取

参考论文中，作者在中国北极黄河站2003年12月和2004年4月五个月的三波段 ($V(437.8nm)$, $G(557.7nm)$, $R(630.0nm)$) 全天空图像 (每天的极光图像约为8000幅左右, CCD摄像仪的拍摄使24小时不间断的拍摄) 中筛选出65天的极光图像数据来行研究。其中, 舍去不存在极光的天数, 以及因太阳光、山峰、冰面等造成亮点、亮斑等的照片。

2.10.3 计算方法

参考论文采用的方法为: 首先根据KEO图找出当天极光的最强时段, 将该时段的极光图像全部提出, 将极光图像处理后得到其强度数据最大值并记录, 最后再将所得到的所有最大强度值进行加权平均。如下图。

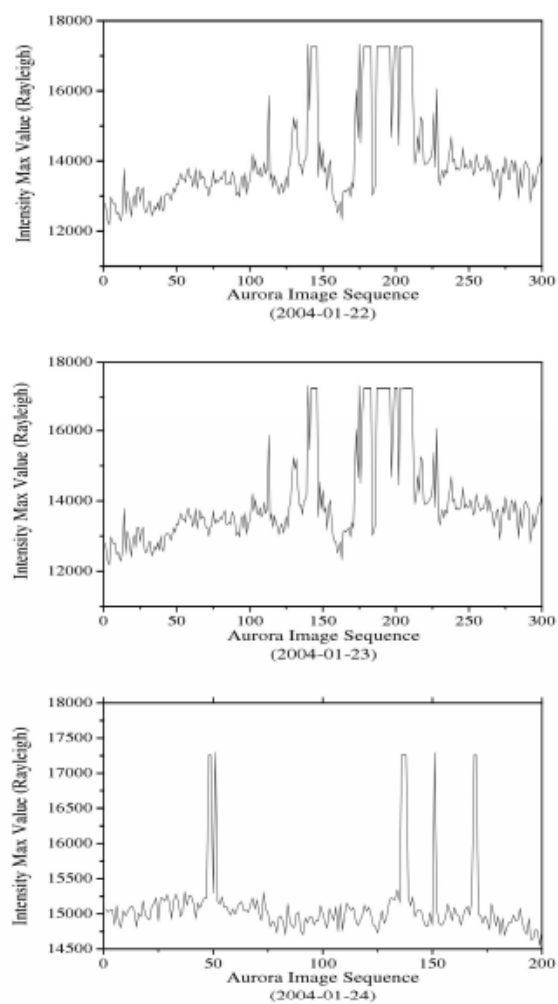


图 17: KEO图数据转化图示例

2.10.4 实验过程

对选取的KEO图像进行分析得到数据表，以G波段的图像据为例，选取2004年1月22日至同年1月24日三天的数据进行加权平均后，得到亮度平均值。

日期	强度最大值平均数 (R)	亮度最大值平均数 ($\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$)
1 月 22 日	$1.4 \times 10^4 \text{R}$	$4 \times 10^{-10} \text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$
1 月 23 日	$1.37 \times 10^4 \text{R}$	$3.9 \times 10^{-10} \text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$
1 月 24 日	$1.51 \times 10^4 \text{R}$	$4.3 \times 10^{-10} \text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$

图 18: G波段极光强度最大值平均值

同理分别选取2004年12月24日、1月22日、1月24日研究V波段，选取同年12月23日至25日研究R波段，V波段、R波段的数据分析结果。

日期	强度最大值平均数 (R)	亮度最大值平均数 ($\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$)
12 月 24 日	2419R	$0.9 \times 10^{-10} \text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$
1 月 22 日	3489R	$1.3 \times 10^{-10} \text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$
1 月 24 日	3181R	$1.2 \times 10^{-10} \text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$

图 19: V波段极光强度最大值平均值

日期	强度最大值平均数 (R)	亮度最大值平均数 ($\text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$)
12 月 23 日	4129R	$1.0 \times 10^{-10} \text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$
12 月 24 日	3429R	$0.9 \times 10^{-10} \text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$
12 月 25 日	2593R	$0.7 \times 10^{-10} \text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$

图 20: R波段极光强度最大值平均值

说明：因为极光强度的下限即为零，因此只分析最大极光强度。

2.10.5 结论

G波段的全天空极光亮度值的范围大约是0到 $4 \times 10^{-10} \text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ；V波段的亮度范围值大约是0到 $1.0 \times 10^{-10} \text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ；R波段的亮度范围大约是0到 $4 \times 10^{-10} \text{W cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$ 。

3 相机灵敏度

本节根据EMVA1288标准介绍相关模型和相机灵敏度阈值近似表达式。

3.1 线性信号模型

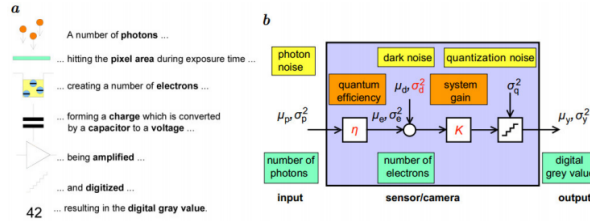


图 21: 相机的物理模型(a)与单像元数学模型(b)

如图所示，一个数字图像传感器本质上就是：将曝光时间内入射到像元面上的一定数量的光子转换为一定数量的电子，然后通过存贮这些电荷的电容转换为一定幅值的电压信号，此信号经放大量化最终变成数字图像的灰度值。假设一个像元的面积为 A ，在一定曝光时间内入射到该像元上的光子数平均为 μ_p 。其中，一部分入射光子被吸收并转换为一定电荷量的电子 μ_e ，转换为电荷的光子数与入射光子数的比定义为总量子效率

$$\eta(\lambda) = \frac{\mu_e}{\mu_p}$$

在曝光时间 t_{exp} 内，入射到面积为 A 的像元上的平均光子数由下式计算

$$\mu_p = \frac{AEt_{exp}}{hc/\lambda}$$

其中 E 为传感器表面的辐照度，单位为 W/m ， $h\nu$ 为单光子能量。

在相机的电子学系统中，通过光子辐射而累计的电荷，首先转化为电压值，然后放大，最后通过模数转换器（ADC）转换为数字信号 y 。假设整个过程是线性的，这个过程就可以通过一个量 K 来描述， K 值称为全局系统增益（单位为 DN/e^- ，即单位电荷转换输出的灰度值）。因此，输出的平均灰度值 μ_y 可表示为

$$\mu_y = K(\mu_e + \mu_d) \quad or \quad \mu_y = \mu_{y.dark} + K\mu_e$$

其中， μ_d 是在没有光照情况下生成的电子数，该值最终转变成零辐照下的平均暗信号 $\mu_{y.dark} = K\mu_d$ （单位是 DN ）。暗信号一般取决于其他参数，特别是曝光时间和环境温度。

3.2 噪声模型

光电转换的电荷数（以电子为单位计算）的波动符合统计规律。根据量子力学，该波动符合泊松（*Poisson*）分布。因此，该波动的方差等于累积电荷数的平均值，即

$$\sigma^2 = \mu_e$$

因为所有的噪声源的方差是线性叠加的，所以数字信号 y 的总时域方差 σ_y^2 ，根据误差传递定律以及泊松分布有

$$\sigma_y^2 = K^2\sigma_d^2 + \sigma_q^2 + K(\mu_y - \mu_{y.dark})$$

其中与传感器的读出和放大电路有关的所有噪声源都可以用一个与信号不相关，方差为 σ_d^2 的正态分布噪声描述。最后的模数转换增加了另一个噪声源，这种噪声在量化区间呈均匀分布，方差为 $\sigma_q^2 = 1/12DN^2$ 。

3.3 信噪比

信噪比(SNR)是指一个电子设备或者电子系统中信号与噪声的比例，其定义为

$$SNR = \frac{\mu_y - \mu_{y.dark}}{\sigma_y}$$

通过代换，得

$$SNR = \frac{\eta\mu_p}{\sqrt{\sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2 + \eta\mu_p}}$$

3.4 灵敏度阈值

最小可探测辐射量或者绝对灵敏度阈值 $\mu_{p.min}$ ，可以用信噪比（ SNR ）进行定义，该值即为满足 $SNR = 1$ 时的光子数均值。有信噪比公式可得

$$\mu_p(SNR) = \frac{SNR^2}{2\eta} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4(\sigma_d^2 + \sigma_q^2/K^2)}{SNR^2}} \right)$$

当信噪比较大时,可做近似

$$\mu_p(SNR) \approx \frac{SNR}{\eta} \left(\frac{\sigma_{y.dark}}{K} + \frac{1}{2} \right)$$

当 $SNR = 1$ 时

$$\mu_{p.min} \approx \frac{1}{\eta} \left(\frac{\sigma_{y.dark}}{K} + \frac{1}{2} \right)$$

3.5 相机灵敏度阈值参考值估算

由1.3.1和1.3.2及3.1中的公式可得

$$\mu_{p.min} = \frac{E_m A t_{exp}}{hc/\lambda} = \frac{4\pi \bar{L} \lambda h^2 A t_{exp}}{hc f^2}$$

其中 \bar{L} 为极光亮度平均值, 为得到更具有参考意义的灵敏度阈值参考值, 建议 \bar{L} 取2.4.5中所得结论数据的百分之十 (或小于百分之十, 以保证所选相机能够拍下大多数亮度极光); λ 为所拍摄极光的波长; h 为像高, 即相机CCD或CMOS的最小宽度 (以获得灵敏度阈值的最小值); A 为相机单个像素的面积; t_{exp} 为相机曝光时间; h 为普朗克常数; c 为光速; f 为相机镜头焦距。